

船舶阻力

姜次平 編

張慶

上海交通大学

一九六五年二月

PDC

17688

船 舶 阻 力

姜 次 平 編



上海 交通 大 学

一 九 六 五 年 二 月

內 容 提 要

本书是一本船舶阻力教材，内容共分十一章。有关阻力的种类和成因、各种阻力的特性尤其是与速度的关系、船模试验、船形对阻力的影响、估计阻力的近似方法、船在限制航道中的阻力和快艇的阻力的主要内容，本书都作了较为全面而扼要的介绍。

凡具备有基础流体力学知识的读者，都可阅读本书。适宜于高等工业学校船舶制造专业作为教材或教学参考书。



上海交通大学姜次平编
上海交通大学教务处印刷厂印刷
上海交通大学教材科发行

开本：850×1168 1/32 印张：9 1/4 插页：2

字数：238,000 印数：1000

1965年2月第1版 1965年2月第1次印刷

定价：1.31 元

书号：6424

目 录

編者序	1
第一章 船舶快速性	3
§ 1-1 研究的对象	3
§ 1-2 研究的方法	3
第二章 阻力的基本概念	5
§ 2-1 阻力的种类	5
§ 2-2 阻力的相似理論	7
§ 2-3 傅汝德的假定	12
第三章 兴波阻力	16
*§ 3-1 坦谷波理論	16
§ 3-2 船波的成因和船波系	25
*§ 3-3 兴波阻力的数学分析	32
§ 3-4 兴波阻力的特性	35
§ 3-5 “凸起”和“凹陷”的預測方法	45
第四章 摩擦阻力	52
§ 4-1 船运动时所生的界层	52
§ 4-2 光滑平板摩擦阻力公式	56
§ 4-3 船体表面弯曲的影响	69
§ 4-4 船体表面粗度的影响	74
§ 4-5 污底	88
§ 4-6 摩擦阻力的計算步驟	92

第五章 旋渦阻力	97
§ 5-1 一般物体的旋渦阻力.....	97
§ 5-2 船体的旋渦阻力.....	102
§ 5-3 船舶阻力的三因次換算方法.....	103
第六章 船模試驗	110
§ 6-1 船模試驗池.....	110
§ 6-2 人工激流法.....	114
§ 6-3 船模阻力数据表达法.....	117
§ 6-4 形似船模組的阻力数据表达法.....	122
第七章 附加阻力	126
§ 7-1 附体阻力.....	126
§ 7-2 空气阻力.....	130
§ 7-3 汹濤阻力.....	140
第八章 船形对阻力的影响	144
§ 8-1 基本概念.....	144
§ 8-2 船模系列試驗.....	145
§ 8-3 排水量长度系数.....	150
§ 8-4 棱形系数、中央剖面系数和方形系数.....	154
§ 8-5 寬度喫水比.....	161
§ 8-6 纵向浮心位置.....	163
§ 8-7 平行中体、最大剖面位置和横剖面面积曲线两端的形式.....	167
§ 8-8 滿載水綫和横剖面的形式.....	169
§ 8-9 船首和船尾的形式.....	173
§ 8-10 特式船形.....	177
§ 8-11 小結.....	181
第九章 估計阻力的近似方法	183
§ 9-1 根据分析整套船模系列試驗結果.....	183

	(1) 泰洛法.....	183
	(2) 陶德法.....	192
	(3) 中村彰一法.....	194
§ 9-2	根据分析船模試驗和实船試航結果.....	196
	(1) 艾亚法.....	196
	(2) 巴甫米尔法.....	203
	(3) 藍潑法.....	206
§ 9-3	根据母船数据.....	206
	(1) 海軍部系数法.....	206
	(2) 馬力曲綫的正切法.....	212
	(3) 引伸比較定律法.....	215
	(4) 修正母船阻力法.....	216
§ 9-4	根据直接馬力图谱.....	220
第十 章	船在限制航道中的阻力	222
§ 10-1	淺水的影响.....	222
§ 10-2	狹水道的影響.....	231
§ 10-3	限制航道船模試驗和換算方法.....	236
§ 10-4	長江船型.....	237
§ 10-5	試驗池的池壁干扰.....	245
第十一 章	快艇的阻力	249
§ 11-1	滑行原理.....	249
§ 11-2	滑行平板的水动力性能及其系数.....	251
§ 11-3	滑行艇的形状.....	257
§ 11-4	快艇阻力的近似估計.....	262
§ 11-5	水翼艇.....	266
附录(一)	附表	271

表 附-1 柏兰特和許立汀公式

表 附-2 桑海公式

表 附-3 1957 年国际公式

表 附-4 水的运动粘性系数 ν 和密度 ρ

表 附-5 船模静水船性计算表

表 附-6 有效马力计算表

附录(二) 常用符号表 280

編 者 序

本教材是以高等工业学校船舶制造专业船舶阻力課程的教學大綱草案和編者歷年來在上海交通大學所作的講稿為基礎而寫成的。

船舶阻力是研究船舶航行時所產生的各種阻力的原因，各種阻力的特性，決定阻力的方法，影響阻力的各種因素以及減少阻力的途徑諸問題，是船舶設計的基本之一。數學分析方法目前還沒有發展到對特定的設計問題足以給出肯定的數字答案。所以本教材以反映直接根據科學試驗方法所獲得的阻力知識為主。

本教材第一章為引言，講述船舶阻力在船舶快速性中的地位 and 船模試驗對能快而具體地解決造船工程領域中提出的實際問題的重要性。接着，分船舶阻力的基本概念，船舶阻力的詳細討論和近似估計以及影響阻力的其他因素三部份講述。

第二章是船舶阻力的基本概念。由環繞船體的流動現象可見其複雜性，今先從作用於船體上的力出發，將阻力分類，以便研究，進而說明產生阻力的原因。由船模試驗時全相似條件實際上不可能實現，轉入傅汝德假定，並加批判。

自第三章至第七章對船舶阻力作詳細討論。由較詳細的講述流動現象出發，分別說明興波阻力、摩擦阻力和旋渦阻力的成因及其與速度的關係。對興波阻力，重點放在從船舶設計角度出發的一些主要問題也就是船波系的干擾和興波阻力與速度的高次方成比例的關係。對於坦谷波理論一節雖非大綱要求，因與興波阻力關係密切，在這裡用偏於物理概念的方式提出，使興波阻力一章的系統性可較完整。興波阻力的數學分析一節也非大綱要求，這裡僅作簡單介紹，可作有興趣者研究這問題的入門。對摩擦阻

力，重点在于分析各种光滑平板摩擦阻力公式並說明其如何应用于船体。对旋渦阻力，重点放在比較由船模試驗結果換算至实际船舶阻力时对旋渦阻力部分的不同处理方法。在第六章船模試驗中，重点在討論分別从設計和研究观点来表达船模阻力数据的方法。第七章是附加阻力，讲述附体、空气和汹濤阻力的特性和估計方法。第九章是估計阻力的近似方法，介紹各种近似估計方法，供船舶初步設計时应用，並重点說明应用的範圍。

影响阻力的其他因素也就是船体的形状、限制航道和滑行三者分別在第八、第十和第十一章中讲述。第八章是船形对阻力的影响。首先提出最佳船形視船速而異的基本概念。接着讲述研究船形的基本方法也就是船模系列試驗。最后討論各种船形参数对阻力的影响。目的在于說明不同速度时优良船形应具有的特点，为設計船形的基础之一。第十章是船在限制航道中的阻力，重点在限制航道对阻力的影响和限制航道中阻力与深水中阻力的关系。第十一章是快艇的阻力，重点在滑行艇的水动力性能和艇体形状的特点。最后是附表和符号表。

王公衡老师和何友声同志在百忙之中抽閒出来极詳尽地审閱了本教材的手稿，大大有助于质量的提高，在此表示衷心的感谢。林宏銓、林杰人、盛振邦、刘应中、秦士元、楊尚榮、湯福坤和錢曉南諸同志在編写过程中給予編者許多帮助，特此致以深切的謝意。

限于編者的水平，本教材的缺点一定很多，希望大家不吝指正，为感为幸！

第一章 船舶快速性

“船舶快速性”也叫“船舶航速性”，包括“船舶阻力”和“船舶推进”两門学科。在本章中先給出其定义並說明其研究的对象。然后討論研究的方法。

§1-1 研究的对象

当船在水中运动时发生阻力，要使船維持以一定速度航行，必須对船供給推力以克服阻力。一般船的推力由推进器供給，推进器的能量来自机器。船舶快速性是研究船舶消耗較小机器馬力以維持一定航行速度的能力的科学。換句話說，若机器馬力一定，船舶以較快的速度航行的能力，所以叫“快速性”或“航速性”。

远在帆船时代，快速性科学的发展非常緩慢。輪船問世后，以蒸汽机、明輪和螺旋推进器代替了风帆，促进了科学的发展。其原因由于在船舶設計时为了保証一定的航速，要求决定所需的較小的机器馬力和相应的优秀船形及其推进器。

为研究方便見，船舶快速性分为“船舶阻力”和“船舶推进”两部分：

- (1) 船舶阻力：研究船体在运动时所生的阻力，
- (2) 船舶推进：研究克服阻力的推进器及其与船体間的交互作用。

§1-2 研究的方法

研究船舶快速性的方法有(1)理論分析,(2)船模試驗和(3)

实船試驗三种，它們是彼此区别而又互相密切联系的。

(1) 理論分析：它的实质是根据实际現象的观察並进行力学抽象，从流体力学中少数被称为公理的基本原则出发，通过邏輯的推理方法以得出船舶阻力和推进問題的規律。虽然在这方面近年来有很大进展，但有的問題因情况复杂要分析时难以应用数学工具，有的問題为簡化分析計而作的一些必要的假定与实际情况有一定距离，因之所得結果当难望准确，也有問題常需对用分析法所計得的結果加以修正，方可比較接近实际。一般來說，能採用理論分析法而得出結論虽在量的方面与实际存在差距，但常可在質的方面用以解釋現象，因而指出改进的方向。因此理論分析仍不失为重要的研究手段之一。

(2) 船模試驗：虽然近年来在分析方面有很大进展，但为快而具体地回答工程领域中提出的問題，特别是要求提供定量的結果时，需要进行小尺寸的船模試驗。这种縮尺試驗得以可靠預示船舶的实际航行情况和最經濟的船体形状及其推进器。实际上进行任何船舶設計，甚至在初步阶段，总是利用在这方面的系統研究的公开发表結果。在今天很少看到一些較重要的船舶在事前未作船模試驗而就建造的。近年来在这方面更見有很大发展。

(3) 实船試驗：实船試驗是用来鑑定船的性能並驗證根据船模試驗結果以預測实际船舶航行情况的准确性，也就是研究船模与实船間的联系問題。因在經濟上化費較大，所以除了新船例行試航外，不常專門进行試驗。

第二章 阻力的基本概念

当船在水中航行时，根据观察，环绕着船体的流动情况是十分复杂的。首先有波浪发生，并靠近船体有一薄层水名为界层随伴船体进行，且于船的尾部常生旋涡。本章先从水作用于船体上的力出发，将阻力分类，以便研究。然后讨论阻力的相似理论和傅汝德的假定。目的在使读者对阻力问题有一初步的基本概念。

§ 2-1 阻力的种类

当船在水中航行时，水被船带动而得到加速度，因之船体与水接触的湿表面受到水的反作用力。这时垂直于湿表面的压力沿船体分佈情况与静浮时不同，且由于水的粘性，在切线方向发生剪力。

在湿表面上取一微湿面积 $d\Omega$ ，见图 2-1，则作用于 $d\Omega$ 上的力有法线方向的压力 $p d\Omega$ 和切线方向的剪力 $\tau d\Omega$ 。这里 p 为压应力， τ 为剪应力。

若船形对称于其中央纵剖面，则压力和剪力对称地分佈于船体湿表面上。因之，其合力 P' 必位于中央纵剖面上。如图 2-1 所示，在船的重心 G 处加上方向相反而大小等于 P' 的力 P 和 P'' 。于是船可视为在重心处受到力 P 和另一力偶 $P'P''$ 。这力偶由船的纵倾而生的纵向稳定力矩所平衡。

P 的垂向分力 Q ，叫支持力，由船的重量所平衡。对于速度

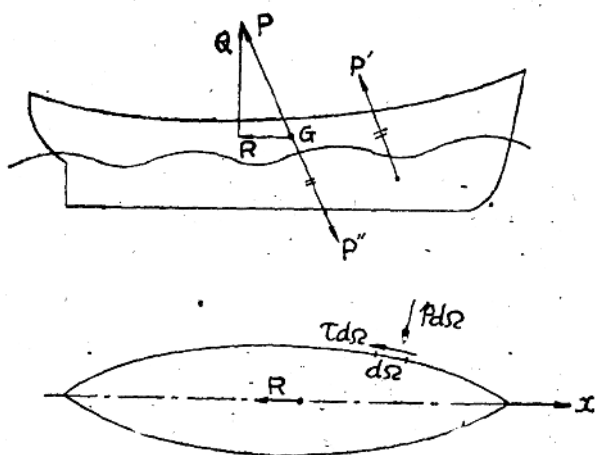


图 2-1

較低的一般船舶， Q 中绝大部分由水的静压力組成，其合力就是浮力。对于高速度的滑艇， Q 中水的动压力佔重要成分，其詳情将在第十一章內討論。 P 的横向分力 R 即为与船运动方向相反的水阻力，或簡称阻力。

由作用于船体湿表面上切向摩擦力所造成的阻力部分叫摩擦阻力 R_f 。作用于微湿面积 $d\Omega$ 上的微切向力在运动方向的分力等于 $\tau \cos(\tau, x) d\Omega$ ，这些微力的和可用积分表示：

$$R_f = \int_{\Omega} \tau \cos(\tau, x) d\Omega \quad (2-1)$$

摩擦阻力系因水的粘性造成船体表面摩擦而生，克服摩擦阻力的功消耗为界层中水的能量。

由作用于船体湿表面上法向压力所造成的阻力部分叫压阻力 R_p 。作用于微湿面积 $d\Omega$ 上的微法向力在运动方向的分力等于 $p \cos(p, x) d\Omega$ ，这些微力的和也可用积分表示：

$$R_p = \int_0 p \cos(p, x) d\Omega \quad (2-2)$$

为研究上方便计，可将阻力用理想流体和粘性流体的流体力学方法分为兴波阻力 R_w 和旋涡阻力 R_v 两类。

在船体曲度骤变之处，尤其是在肥满的船尾部，常发生旋涡。有旋涡处的压力降低，因而改变沿船体表面压力分佈情况而生阻力，叫旋涡阻力。克服旋涡阻力的功消耗为旋涡的能量。

当船航行于水面之上，产生波浪，因而改变沿船体表面的压力分佈情况而生阻力，叫兴波阻力。克服兴波阻力的功消耗为波浪的能量。

必须指出，兴波阻力与摩擦阻力和旋涡阻力两者之间有根本性差别：兴波阻力在理想流体中仍将产生，但摩擦阻力和旋涡阻力两者都因水的粘性而生，所以在理想流体中均将消失，这就是著名的达兰贝尔矛盾。摩擦阻力和旋涡阻力两者也可统称为粘性阻力 R_v 。

因之，船的总阻力 R_t 可以用摩擦阻力 R_f 、旋涡阻力 R_v 及兴波阻力 R_w 三者的和表示之：

$$R_t = R_f + R_v + R_w \quad (2-3)$$

若已知船在某速度 v 时的阻力 R ，则拖曳这船沿一直线等速前进所需的马力叫有效马力 EHP 。所以

$$EHP = \frac{Rv}{75} \quad (2-4)$$

其中 R 为阻力以公斤计， v 为船速以每秒米计。

§ 2-2 阻力的相似理论

在流体力学的目前情况下，仅根据理论分析还不能确定船在水中航行的阻力。实际上常需进行船模试验，并将船模试验结果通过相似理论换算到实船的阻力。

(1) 雷诺定律：若两几何相似的薄平板顺其平面方向在深水

中运动，因离水面很远，不致发生波浪，且其形状不致产生旋涡，所以其阻力纯为摩擦阻力。假定其摩擦阻力 R_f 是与水的密度 ρ 、平板的长度 L 、平板的速度 v 和水的粘性 μ 有关，而写作：

$$R_f = f(\rho; L, v, \mu) = \Sigma k \rho^a L^b v^c \mu^d \quad (2-5)$$

其中 k 、 a 、 b 、 c 和 d 都是无因次常数。

式(2-5)中的物理量的因次都可用三种基本因次即质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 和时间 $[T]$ 来表示。根据因次理论，任何物理公式左右两边的因次必须一致。若对某物理量不知其为何种函数，常可利用这种原理，列出其因次方程式，比较基本因次的指数，以找到无因次参数。式(2-5)的因次方程式如下：

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^a \left[L \right]^b \left[\frac{L}{T} \right]^c \left[\frac{M}{LT} \right]^d \quad (2-6)$$

比较式(2-6)中三基本因次的指数，得下列联列方程式：

$$\begin{cases} [M]: & 1 = a + d \\ [L]: & 1 = -3a + b + c - d \\ [T]: & -2 = -c - d \end{cases} \quad (2-7)$$

解式(2-7)，得 $a = 1 - d$ ， $b = 2 - d$ ， $c = 2 - d$ 。代入式(2-5)，得

$$R_f = \Sigma k \rho^{1-d} L^{2-d} v^{2-d} \mu^d = \rho L^2 v^2 \Sigma k \left(\frac{vL}{\nu} \right)^{-d}$$

其中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ，叫水的运动粘性系数。现尚不知 d 为何数，但可写作：

$$\frac{R_f}{\rho L^2 v^2} = f\left(\frac{vL}{\nu}\right) \quad (2-8)$$

式(2-8)中 $\frac{R_f}{\rho L^2 v^2}$ 和 $\frac{vL}{\nu}$ 都无因次。因 L^2 与平板湿面积 Ω 的因次相同，通常用 Ω 代替。 ρv^2 常改为 $\frac{1}{2} \rho v^2$ ，相当于水的

动压力，这样 $\frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho\Omega v^2}$ 代表单位面积的摩擦阻力与动压力的比，叫摩擦比阻力 ζ_f ，也叫摩擦阻力系数。 $\frac{vL}{\nu}$ 是雷诺数，常简称为 R_n 。

$$\therefore \frac{R_f}{\frac{1}{2}\rho\Omega v^2} = \zeta_f = f(R_n) \quad (2-9)$$

这就是雷诺定律。

(2) 傅汝德定律：若两几何相似的船形似船在水面进行，产生波浪，变更水面高度。忽视水粘性的影响，则其阻力纯为兴波阻力。假定其兴波阻力 R_w 是与水的密度 ρ 、船的长度 L 、船的速度 v 和引力常数 g 有关，而写作：

$$R_w = f(\rho, L, v, g) = \Sigma k \rho^a L^b v^c g^d \quad (2-10)$$

其中 k 、 a 、 b 、 c 和 d 都是无因次常数。

式(2-10)的因次方程式如下：

$$\left[\frac{ML}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^a \left[L \right]^b \left[\frac{L}{T} \right]^c \left[\frac{L}{T^2} \right]^d \quad (2-11)$$

比较式(2-11)中三基本因次的指数，得下列联列方程式：

$$\begin{cases} [M]: & 1 = a \\ [L]: & 1 = -3a + b + c + d \\ [T]: & -2 = -c - 2d \end{cases} \quad (2-12)$$

解式(2-12)，得 $a=1, b=2+d, c=2-2d$ 。代入式(2-10)，得

$$R_w = \Sigma k \rho L^{2+d} v^{2-2d} g^d = \rho L^2 v^2 \Sigma k \left(\frac{v^2}{gL} \right)^{-d}$$

现尚不知 d 为何数，但可写作：

$$\frac{R_w}{\rho L^2 v^2} = f\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right) \quad (2-13)$$

式(2-13)中的 $\frac{R_w}{\rho L^2 v^2}$ 也常改写为 $\frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho\Omega v^2}$ ，叫兴波比阻

力 ζ_w ，也叫兴波阻力系数，其中 Ω 是船的湿面积。无因次的 $\frac{v}{\sqrt{gL}}$ 是傅汝德数，常简称为 Fr 。

$$\therefore \frac{R_w}{\frac{1}{2}\rho\Omega v^2} = \zeta_w = f(Fr) \quad (2-14)$$

这就是傅汝德定律。

两大小不同的形似船或船与其船模，其速度 v 各与其 gL 的平方根成相同的比例，叫相当速度。换句话说，在相当速度时，两船的傅汝德数相同，其兴波比阻力为一常数。因引力常数 g 为一常数，傅汝德数在有些国家常用 $\frac{V}{\sqrt{L}}$ 代替，其中 V 以每小时时计（每小时时数常简称节数）， L 以呎计， $\frac{V}{\sqrt{L}}$ 叫速长比。

傅汝德数与速长比间的关系如下：

$$Fr = 0.298 \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (2-15)$$

注意 1 哩 = 1852 米，英制为 1 哩 = 6080 呎，1 米 = 3.28 呎， $g = 9.81$ 米/秒²，英制为 $g = 32.2$ 呎/秒²。

因在形似船，湿面积 $\Omega \propto L^2$ ，又若速度相当，傅汝德数为一常数， $v^2 \propto gL$ ，所以由式 (2-14) 可知，

$$R_w \propto \rho g L^3$$

$$\propto \gamma L^3$$

也就是

$$R_w \propto D$$

或
$$\frac{R_w}{D} = \text{常数} \quad (2-16)$$

这里 γ 为水的比重， D 为船的排水量。

所以形似船在相当速度时，其兴波阻力与其排水量成一定比例，也就是其单位排水量的兴波阻力为一常数。这是傅汝德定律的另一形式。傅汝德定律常也叫傅汝德比较定律。